

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

制造业技术创新过程与方法丛书

基于 TRIZ 的机械系统 失效分析

许波 檀润华 著

Failure Analysis of Mechanical Systems
Based on TRIZ

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

制造业技术创新过程与方法丛书

基于 TRIZ 的机械系统 失效分析

Failure Analysis of Mechanical Systems
Based on TRIZ

许波 檀润华 著

JIYU TRIZ DE JIXIE XITONG
SHIXIAO FENXI

高等教育出版社·北京

内容简介

失效分析在方案设计阶段对系统潜在失效进行预测、分析和解决，从而对新设计系统进行优化。但面对复杂的机械系统，传统的失效分析方法在应用时出现诸多缺陷。本书从失效分析的基本概念和方法出发，阐述了将 TRIZ 应用于失效分析的可行性，对 TRIZ 在失效分析的模型构建、失效模式构建、失效筛选、失效排序和失效解决等环节中的应用进行了论述，提出了完整的基于 TRIZ 的机械系统失效分析方法过程模型，并提供了丰富和翔实的工程案例进行演示和验证。本书是对 TRIZ 方法应用的扩展以及对机械系统失效分析方法的进一步完善。

本书特别适合机械工程学科相关专业的本科生、研究生以及从事机械行业的工程师学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 TRIZ 的机械系统失效分析 / 许波, 檀润华著
— 北京: 高等教育出版社, 2016. 7
(制造业技术创新过程与方法丛书)
ISBN 978-7-04-045516-8

I. ①基… II. ①许… ②檀… III. ①机械系统-失效分析 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 102044 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	刘占伟	特约编辑	陈 静	封面设计	杨立新
版式设计	范晓红	插图绘制	杜晓丹	责任校对	殷 然	责任印制	韩 刚

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京汇林印务有限公司	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.com
印 张	15.5		http://www.hepmall.cn
字 数	290 千字	版 次	2016年7月第1版
插 页	1	印 次	2016年7月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	79.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 45516-00

作者简介



许波, 工学博士, 现就职于河北工业大学, 任机械工程学院中心实验室书记、副主任。主要研究方向为机电一体化系统设计、创新设计、失效分析等。作为主要参与人完成国家自然科学基金、河北省自然科学基金、天津市自然科学基金等科研项目多项。长期致力于企业的技术改造和创新, 完成具有重要影响的横向课题多项。



檀润华, 教授, 工学博士。现任河北工业大学副校长、全国政协委员、国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心主任。学术兼职为国家创新方法研究会常务理事、技术创新方法专业委员会理事长、TRIZ研究会理事长、中国机械工程学会理事等。主要研究方向为技术创新过程与方法、TRIZ、创新设计、定制设计等。主持完成中国工程院战略研究项目子项、国家支撑计划、863 计划、创新方法工作专项、国家自然科学基金、教育部重点项目以及企业横向课题多项。发表论文 400 余篇, 出版专著 9 部, 申请并获得专利和软件著作权 20 余项。

前 言

失效分析可以在新系统的设计和加工阶段对潜在的故障或失效进行预测, 分析其对可靠性的影响并提前解决存在的问题, 从而提高系统的可靠性。自 20 世纪 50 年代以来, 失效分析始终是国内外学者研究的热点问题, 并形成了诸多方法和理论, 取得了较多的成果。但由于机械系统的复杂性, 传统的失效分析方法在应用时出现诸多缺陷, 造成结果失真。现代机械系统设计理论需要对失效分析方法进行不断研究与完善。

苏联的发明问题解决理论 (TRIZ) 是应用前人创新知识解决今天面临复杂问题的系统化理论与方法。TRIZ 不仅能用于产品开发各阶段的创新, 也能用于失效预测。但已有的基于 TRIZ 的失效预测理论并不完善, 需要进一步的研究。

过去的几年, 本书编写人员一直致力于 TRIZ 和机械系统失效分析的研究。在大量阅读 TRIZ 和失效分析领域众多学者研究成果、文献资料的基础上, 逐渐形成了基于 TRIZ 的机械系统失效分析方法的基本概念、过程和模型。本书是对近几年研究成果的汇总和提炼。

本书共分 8 章。第 1 章为概论, 主要介绍失效分析的相关概念和研究现状, 以及传统失效分析方法在现代机械系统中应用的局限性; 第 2 章论证了 TRIZ 理论应用于机械系统失效分析的可行性, 提出基于 TRIZ 的机械系统失效分析方法; 第 3~7 章分别对基于 TRIZ 的机械系统失效分析方法的模型构建、失效模式构建、失效筛选、失效排序和失效解决等分析过程进行了阐述和说明; 第 8 章将基于 TRIZ 的失效分析方法应用于实际的工程案例, 并进行了完整的演示。为了更好地说明该方法的原理、过程和应用, 本书在每一章都采用工程实例进行了演示和说明。

本书的编写得到了科技部创新方法工作专项 (2013IM030400)、国家自然科学基金项目 (51275153、51475137) 的资助。

书中对于 TRIZ 理论和失效分析的观点和论述或许存在不妥之处, 欢迎读者批评指正。

许波 檀润华

河北工业大学机械工程学院

2016 年 4 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 失效分析概述	1
1.2.1 相关概念	1
1.2.2 失效分析技术的产生和发展	2
1.2.3 失效分析在机械产品开发流程中的定位	3
1.3 传统失效分析方法	4
1.3.1 传统失效分析方法的分类	4
1.3.2 FMEA 方法	5
1.3.3 AFD 方法	9
1.3.4 机械系统的失效分析	11
1.4 本章小结	14
第 2 章 基于 TRIZ 的机械系统失效分析可行性	15
2.1 问题和问题解决	15
2.1.1 问题定义	15
2.1.2 问题分类	16
2.1.3 问题解决	17
2.1.4 创新技法	19
2.2 TRIZ 体系结构	20
2.3 TRIZ 的几种主要工具	22
2.3.1 TRIZ 中的资源	22
2.3.2 物质－场模型和 76 个标准解	24
2.3.3 TRIZ 中的冲突和 40 条发明原理	26
2.4 TRIZ 应用于机械系统失效分析的可行性	30
2.4.1 TRIZ 中的反向鱼骨图与模型构建	30
2.4.2 TRIZ 中的“逆向提问”用于失效模式预测	32
2.4.3 TRIZ 中的资源概念用于失效筛选	32
2.4.4 TRIZ 中的问题解决工具用于失效解决	33
2.5 基于 TRIZ 的机械系统失效分析方法	33
2.6 本章小结	35

第 3 章 机械系统等级全息模型	37
3.1 系统模型构建方法	37
3.1.1 风险定义	37
3.1.2 传统失效分析方法的模型构建	40
3.2 等级全息建模方法	44
3.2.1 等级全息建模思想的产生和特点	45
3.2.2 等级全息建模过程和应用	46
3.3 机械系统 HHM 模型	51
3.3.1 机械系统的影响因素	51
3.3.2 影响因素的分解	52
3.3.3 机械系统 HHM 模型构建	54
3.4 工程实例	55
3.4.1 系统影响因素分析	56
3.4.2 系统 HHM 模型构建	58
3.5 本章小结	59
第 4 章 机械系统失效模式构建	61
4.1 机械系统成功模式构建	61
4.1.1 机械系统 HHM 模型对应的成功模式	61
4.1.2 机械系统成功模式列表	63
4.2 基于 TRIZ“逆向思维”的系统失效模式构建	64
4.3 工程实例	65
4.4 本章小结	67
第 5 章 机械系统失效筛选	69
5.1 失效产生的原因	69
5.1.1 失效的 S_0 原则	69
5.1.2 失效的资源原则	70
5.2 机械系统资源查找	71
5.2.1 TRIZ 中的资源分类	71
5.2.2 企业管理范畴的资源分类	73
5.2.3 机械系统属性	75
5.2.4 机械系统资源清单模型构建	76
5.2.5 资源查找算法及其改良	77
5.3 基于资源的机械系统失效筛选模型	80
5.3.1 失效筛选的意义	80
5.3.2 失效筛选的过程	81
5.3.3 机械系统失效筛选模型	81

5.4 工程实例	83
5.5 本章小结	86
第 6 章 机械系统失效的等级优先排序	87
6.1 FMEA 的失效等级排序	87
6.1.1 FMEA 中的 RPN 方法	87
6.1.2 RPN 公式的缺陷及后续研究	90
6.2 基于经济损失的 RPN 方法	98
6.2.1 机械系统失效的工艺性特点	98
6.2.2 基于经济损失的 RPN 方法中的定性和定量分析	99
6.2.3 失效的概率分析和经济损失分析	101
6.3 机械系统失效优先等级排序模型	103
6.4 工程实例	104
6.5 本章小结	110
第 7 章 机械系统失效解决过程模型	111
7.1 TRIZ 中的问题解决方法	111
7.2 基于直接方法和 40 条发明原理的失效解决	112
7.2.1 基于直接方法物质-场模型和冲突解决原理的失效解决模型	114
7.2.2 失效解决模型应用的工程实例	118
7.3 机械系统失效分析过程模型	125
7.4 本章小结	128
第 8 章 基于 TRIZ 的机械系统失效分析方法的工程应用	131
8.1 被分析系统情况介绍	131
8.2 系统基于 HHM 模型的结构分解和模式构建	132
8.2.1 双层网骨架膨化岩石板自动生产系统的总体方案	132
8.2.2 系统结构 HHM 分解和模式构建	133
8.3 系统失效筛选	151
8.3.1 系统资源列表的构建	151
8.3.2 基于资源的系统失效模式筛选	152
8.4 系统失效优先等级排序	165
8.5 系统重要失效模式的解决	175
参考文献	215
附录 物质-场模型与发明原理的对应关系表	223

第 1 章 概 论

1.1 引言

失效是人们的主观认识与客观事物相互脱离的结果。失效分析是人们认识客观事物本质和规律的逆向思维探索, 是对正向思维研究的不可缺少的重要补充, 是变失效 (失败) 为安全 (成功) 的关键, 是人们深化客观事物认识的知识源泉。失效分析, 改进提高, 再失效分析研究, 再提高发展, 如此往复循环, 螺旋上升, 发展飞跃, 这是人类科学技术发展历史乃至社会发展历史的全过程。

科学技术是第一生产力, 高科技的发展已成为国民经济和国防科技发展的关键和主要依托, 而高科技的发展也依赖于其发展中的失效分析预测和预防。从某种程度上讲, 高科技的发展更需要失效分析预测和预防技术的进一步强化, 失效分析预测和预防理应为高科技发展研究领域之一^[1]。

1.2 失效分析概述

1.2.1 相关概念

失效是指设备或装置失去或不能完全达到原有设计所规定的功能^[1-2]。机械产品的零件或部件的失效表现在以下 3 个方面:

- (1) 零件或部件完全丧失原定功能;
- (2) 仍然可以工作, 但已不能令人满意地实现预期的功能;
- (3) 受到严重损伤或具有安全隐患, 继续使用会丧失安全性和可靠性。

判断失效产品的失效模式, 查找产品失效机理和原因, 提出防止再失效的对策的技术活动和管理活动称为失效分析。失效分析的主要内容包括^[3]:

- (1) 调查 (包括确认是否失效、取证、普查等);
- (2) 判断失效模式;
- (3) 查找失效原因 (包括与产品失效相关的管理因素);
- (4) 探讨失效机理及其与失效模式的关系 (过程的因果关系);

- (5) 失效后果 (影响和危险性) 分析;
- (6) 合理制订失效判据 (必要时才进行);
- (7) 失效的数理统计分析 (必要并有条件时才进行);
- (8) 模拟再现和失效预测 (必要并有条件时才进行);
- (9) 明确产品失效责任 (必要时才进行);
- (10) 提出防止再失效的对策, 注意新的失效因子。

1.2.2 失效分析技术的产生和发展

失效分析技术于 20 世纪 30 年代出现, 至今共经历了 3 个发展阶段^[4]。

1) 初期发展阶段 (20 世纪三四十年代)

可靠性问题的研究首先是从军用航空电子设备开始的。第二次世界大战期间, 雷达、飞航式导弹等较复杂的新式武器开始投入战场, 而这些武器的核心 —— 电子设备屡出故障, 严重影响了部队的战斗力, 武器装备可靠性问题开始引起军方和舆论界的重视。

可靠性问题最早是由美国军用航空部门提出的。1939 年, 美国航空委员会出版的《适航性统计注释》一书中, 首先提出飞机故障率不应超过 0.000 01 次/h, 相当于一小时内飞机的可靠度 $R_s=0.999\ 99$, 可以认为这是最早的飞机安全性和可靠性定量指标。

第二次世界大战末期, 德国的火箭专家首先将 V-II 火箭诱导装置作为串联系统, 利用概率乘法公式求出其可靠度为 75%, 这是第一次定量计算一个复杂系统的可靠度。

2) 中期发展阶段 (20 世纪五六十年代)

第二次世界大战结束后, 工程技术人员和数学家们运用概率论与数理统计知识, 对产品的可靠性问题进行了大量的定性和定量研究。美国先后研制出 F-111A 和 F-15A 战斗机等装备, 这些新一代装备对可靠性提出了严格的要求。

我国从 20 世纪 60 年代起, 首先在国防工业和电子工业中开始进行可靠性研究和普及工作, 继而在其他部门逐步推广应用。现在已建立了相应的可靠性组织^[5]。

3) 发展国际化阶段 (20 世纪 70 年代以后)

1965 年, 国际电工委员会 (IEC) 可信性技术委员会 (TC-56) 的成立标志着可靠性工程已成为一门国际化技术^[6]。在这一阶段, 可靠性理论研究从数理基础发展到失效机理研究, 形成了可靠性实验方法及数据处理方法, 重视机械系统的研究及维修性的研究, 建立了可靠性管理机构, 颁布了可靠性标准。

1980 年以后, 可靠性工程向着更深、更广的方向发展。从元件的可靠性研究发展到了系统的可靠性研究, 形成了以失效模式和影响分析 (FMEA)、失效模式影响

和危害性综合分析 (FMECA)、失效树分析 (FTA) 和框图法等为标志的一套较完整的系统可靠性分析与设计理论和方法, 并且产生了大型的工具软件, 如 Relisoft^[7] 和 Bloeksim^[8] 等。同时, 人们开始研究大型机电产品的可靠性分析与增长理论和方法, 软件可靠性、维修性分析与设计理论和方法等深层次的问题。

进入 21 世纪以后, 与产品可靠性相关的产品维修性、测试性和综合保障技术也越来越受到重视并得到发展, 出现了以可靠性为核心的维修理论^[9]。例如, 可分别对飞行器的电气系统和非电气系统进行状态监控和检测的 BIT 及 HAMP 系统, 以保证战斗力、降低成本和提高营运效益为目标的军 (民) 用飞行器的综合保障技术以及远程健康监控技术等。

1.2.3 失效分析在机械产品开发流程中的定位

机械产品的开发流程分为 7 个步骤: 构思筛选、确定范围、开发项目立项、实体开发、测试和修正、投放市场、产品上市后的评估^[10]。结合产品开发流程的定义和各阶段的功能, 整个流程可分为 3 个阶段: 从构思筛选到产品开发项目立项为开发前期, 称为产品开发项目的选择阶段; 从实体开发到测试和修正为开发中期, 称为产品开发阶段; 最后投放市场和产品上市后的评估为开发后期, 称为产品商业化阶段, 如图 1.2.1 所示。

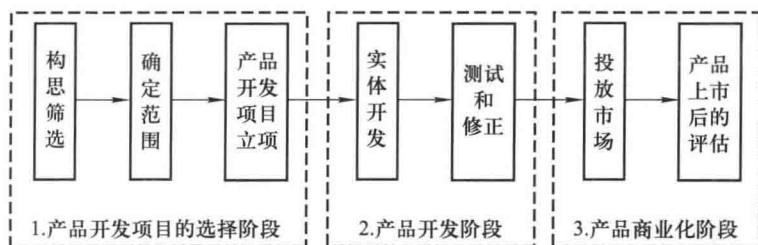


图 1.2.1 机械产品开发流程的 3 个阶段

产品开发阶段是整个机械产品开发流程的中心环节, 也是对产品价值的改变贡献最多的阶段, 这一阶段的工作决定着产品开发的质量、时间和成本^[10]。与其他阶段相比较, 企业在产品开发项目的选择阶段投入的资源很少, 受风险影响的标的物也很少, 而产品商业化阶段中的不确定性主要集中在市场方面。只有在产品开发阶段, 不仅大量资源的投入存在风险, 而且有来自多方面的不确定性, 因此需要全面地考虑风险问题, 这一阶段的管理工作在整个产品开发风险管理中尤为重要。

因此, 失效分析的工作重心应放在机械产品开发流程的第二个阶段, 也就是产品开发阶段。

1.3 传统失效分析方法

1.3.1 传统失效分析方法的分类

根据 Stan Kaplan 等人的描述, 失效分析 (risk analysis, RA) 可视为对以下 3 个问题的回答^[11]:

- (1) 被研究的系统或者操作中什么会出错?
- (2) 这种风险发生的可能性有多大?
- (3) 如果风险发生, 将造成什么样的后果?

对于这 3 个问题的回答, 形成了诸多的失效分析方法。按照这些失效分析方法的主要用途, 通常将其分为两大类。

第一类方法主要用来分析和确定失效的关键因素, 这类方法包括: 主次图法、趋势图法和特征-因素分析法 (鱼刺图法, HBA); 第二类方法主要用来分析失效的模式、影响、危害性及其解决措施, 这类方法包括失效模式分析 (FMA)、失效影响分析 (FEA)、失效危害性分析 (FCA)、失效模式和影响分析 (FMEA)、失效模式影响和危害性分析 (FMECA)、失效树分析 (FTA) 和事件树分析 (ETA)。其中, 比较常用的是 FMEA, 用于汽车和航空工业; 危险与可操作性分析 (HAZOP) 广泛应用于化工工业; FTA 和 ETA 广泛应用于核工业。

20 世纪 70 年代, 苏联 Kishnev TRIZ 学校的 Boris Zlotin 等采用逆向思维的方法将发明问题解决算法 (ARIZ) 逆向应用于失效分析, 提出一种称为预期失效分析 (AFD) 的失效分析方法, 并进行了后续研究和开发。

传统失效分析方法及其特点^[12] 如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 传统失效分析方法及其特点

传统失效分析方法的名称	主要特点
主次图法	分析系统中的基本环节和关键环节, 还可以用于质量管理
特征-因素分析 (HBA)	全面分析, 剔除失效的次要因素, 抓住主要或基本因素
失效模式分析 (FMA)	由失效特征 (基本的和主要的因素) 确定失效模式
失效影响分析 (FEA)	分析各种失效模式, 确定对系统的影响程度
失效危害性分析 (FCA)	分析各种失效模式, 确定各种失效危害性及其严重程度
失效模式和影响分析 (FMEA)	综合了 FMA、FEA 的优点, 分析失效原因, 提出对策

续表

传统失效分析方法的名称	主要特点
失效模式影响和危害性分析 (FMECA)	综合了 FMA、FEA、FCA 的优点, 全面分析失效原因, 提出对策
失效树分析 (FTA)	对产品失效进行图解和逻辑推理, 由失效结果分析失效原因
事件树分析 (ETA)	与 FTA 功能基本相同, 但时间顺序相反, 由失效原因到失效结果
预期失效分析 (AFD)	采用逆向提问主动预测失效, 采用发明问题解决理论 (TRIZ) 进行失效的解决

上述的传统失效分析方法中, FMEA 方法在机械系统的失效分析中最为常用, 对它的研究也较多。AFD 方法经美国 Ideation International 公司的 TRIZ 专家提出后, 也迅速成为机械领域失效分析方法研究的热点。

1.3.2 FMEA 方法

1. FMEA 方法的源起

失效模式和影响分析 (failure mode and effects analysis, FMEA) 是工程应用中最常用的可靠性分析方法之一, 是在产品设计和加工过程中分析各种潜在的失效对其可靠性的影响, 用以提高产品可靠性的一种分析技术。FMEA 以产品的元件、零件或系统为分析对象, 通过逻辑思维分析并预测结构元件或零件生产装配中可能发生的问题及潜在的失效, 研究问题和失效的原因以及对产品质量影响的严重程度, 提出可能采取的预防改进措施, 以提高产品质量和可靠性^[13-16]。

FMEA 技术的应用发展十分迅速。20 世纪 50 年代初, 美国第一次将 FMEA 思想用于一种战斗机操作系统的设计分析; 60 年代中期, FMEA 技术正式用于航天工业 (Apollo 计划); 1976 年, 美国国防部颁布了 FMEA 的军用 (设计) 标准; 70 年代末, FMEA 技术开始进入汽车工业和医疗设备工业; 80 年代初, 进入微电子工业; 80 年代中期, 汽车工业开始应用过程 FMEA 确认其制造过程; 1988 年, 美国联邦航空局要求所有航空系统的设计及分析都必须使用 FMEA; 1991 年, ISO-9000 推荐使用 FMEA 提高产品和过程的设计, 被美国太空总署 (NASA)、国防部及各军种在发展武器系统或安全程序时引用, 逐渐推广至其他相关军需用品、电子设备等。之后, 美国克莱斯勒、福特、通用三大汽车厂与数千家供应商共同组成汽车工业策进会 (AIAG), 于 1992 年提出 QS9000 质量管理体系, 成为制造业质量保证的高水平要求范本。而 FMEA 成为 QS9000 中一项必备的分析方法, 以确保所有可能的失效或失效模式在产品交付顾客之前就能被适当地定义, 且通过设计预防、稳定生产达到

顾客满意的要求。1994 年, FMEA 又成为 QS9000 的认证要求。

目前, FMEA 已在工程实践中形成了一套完整的分析方法, 并在产品的整个生命周期得到广泛应用^[17]。产品生命周期各阶段 FMEA 应用比例表如表 1.3.2 所示。

表 1.3.2 产品生命周期各阶段 FMEA 应用比例表

序号	阶段	比例/%
1	设计	27
2	制造	25
3	使用	17
4	企划开发	14
5	施工	11
6	试验	6

2. FMEA 方法实施过程

系统的 FMEA 一般按照如图 1.3.1 所示的步骤进行。

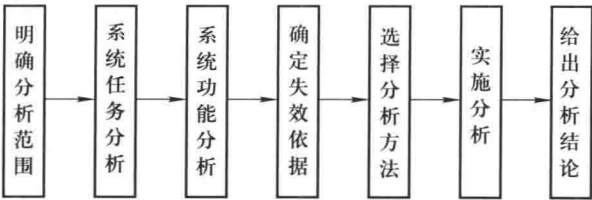


图 1.3.1 FMEA 步骤

- (1) 明确分析范围。根据系统的复杂程度、重要程度、技术成熟性、分析工作的进度和费用约束等, 确定系统中进行 FMEA 的产品范围。
- (2) 系统任务分析。描述系统的任务要求及系统在完成各种任务时所处的环境条件。
- (3) 系统功能分析。分析明确系统中的产品在完成不同的任务时所应具备的功能、工作方式及工作时间等。
- (4) 确定失效依据。制订与分析判断系统及系统中产品正常与失效的准则。
- (5) 选择分析方法。根据分析的目的和系统的研制阶段, 选择相应的 FMEA 方法, 制订 FMEA 的实施步骤及实施规范。
- (6) 实施分析。FMEA 分析包括失效模式分析、失效原因分析、失效影响分析、失效检测方法分析与补偿措施分析等步骤。失效模式分析是找出系统中每一产品所有可能出现的失效模式; 失效原因分析是找出每一个失效模式产生的原因; 失效影响分析是找出系统中每一个失效模式所产生的影响, 并按这些影响的严重程度进行分类; 失效检测方法分析是分析每一个失效模式是否存在特定的发现该失效模式的

检测方法, 从而为系统的失效检测与隔离设计提供依据; 补偿措施分析是针对影响严重的失效模式, 提出设计改进和使用补偿的措施。

(7) 给出分析结论。根据失效模式影响分析和危害性分析的结果, 找出系统中的缺陷和薄弱环节, 并制订和实施各种改进与控制措施, 以提高产品或功能的可靠性或有效性、合理性等。

3. FMEA 方法的分析内容

失效模式和影响分析内容包括潜在失效分析、潜在失效后果分析、后果的严重程度分析、失效机理分析、失效发生概率分析、现行设计过程控制、控制措施的探测度分析、风险优先数的确定等。

(1) 潜在失效分析。在最初的设计过程潜在失效分析过程中, 负责该分析的设计工程师应主动联系有关部门, 了解包括机房条件、电源、设备等相关信息。这样的联系可以加强有关部门的交流, 对发现潜在的问题是非常有益的。

(2) 潜在失效后果分析。潜在失效后果就是失效模式对产品/服务或系统功能的影响。这种影响可能是内部的, 也可能是外部的。对失效后果的描述要清楚说明该失效是否会影响安全性或是否与法规相符。失效的后果必须依据所分析的具体系统、产品或服务, 并尽可能地预见失效的后果。

(3) 后果的严重程度分析。FMEA 将失效后果的严重程度, 用 1 到 10 的数值表示。通过设计, 减少严重程度的级别数值。

(4) 失效机理分析。潜在失效机理分析是指设计的薄弱环节或不当的设计形式, 其作用的结果就是失效模式。在尽可能的范围内识别所有的失效原因, 并简明扼要地将原因/机理列出来, 针对相应的原因采取适当的措施。

(5) 失效发生概率分析。通过设计更改来消除或控制一个或更多的失效原因/机理, 降低失效发生的可能性。可能性的评估分为 1 到 10 级。

(6) 现行设计过程控制。根据分析结果, 列出预防措施, 设计确认或验证以及其他相应活动。一方面防止失效原因或失效模式后果的出现, 或减少它们出现的可能性; 另一方面查出原因/机理并就此找到纠正措施, 同时查明失效模式。

(7) 控制措施的探测度分析。为了取得较低的数值, 应该不断地采取预防、设计确认和验证等活动, 以不断地改进。

(8) 风险优先数的确定。风险优先数 (risk priority number, RPN) 是评估出特定失效模式的严重程度、发生概率和检测难易程度后所求得的值, 即: $RPN = S \times O \times D$ 。其中, S 为失效的严重程度; O 为失效的发生概率; D 为失效的检测难易程度。通过风险度评估可改善优先顺序。

4. FMEA 的主要评价方法

FMEA 主要目的在于分析影响系统失效的主要原因,找出关键失效的可能发生源。因此,除了必须了解 FMEA 表格建立的分析方法及程序外,另一个重要的工作原则是如何去评价各因子的影响程度,使高风险的影响因子能正确地反应产品本身的可能失效情况,以便使工程设计人员能快速且有效地采取对策,降低产品风险、减少成本浪费并缩短项目时间。

FMEA 常用的两种基本方法是硬件分析法和功能分析法:

(1) 硬件分析法是根据系统的功能框图和可靠性框图,对组成系统的各个单元可能发生的所有失效模式及其对系统功能的影响进行分析,并列出表格,是一种较为严格和周密的分析方法。

(2) 复杂系统的每一个分系统或单元都具有一定的功能,每一种功能就是一项输出,逐一列出这些输出,分析它们的失效模式及其对系统功能的影响,即为功能分析法。

上述两种方法互有利弊,实际工程中究竟采用何种方法进行分析,取决于可利用的资料、信息的多少和系统的复杂程度。

5. FMEA 方法的优点及其不足

作为一种相对比较成熟并被广泛采用的失效分析方法和工程管理技术, FMEA 在众多的行业领域的实际应用中均取得了较好的效果, FMEA 具有明显的优点^[18]:

- (1) 原理简单,方法简便,同时可实现定性分析与定量分析;
- (2) 适合在系统设计阶段使用,也适合在系统实施阶段使用;
- (3) 可以根据顾客对项目需求的影响性列出失效模式的改进措施;
- (4) 提供设计评估的参考资料,以便累积工作经验。

传统 FMEA 的主要问题在于:

(1) FMEA 一般是静态的单一元素分析法,是针对点问题的分析,着重解决单个失效形式 (FM) 和失效影响 (FE) 对应的问题,而对于系统内部各部分相互影响的研究并不深入。因此,对于多功能、多重失效的系统, FMEA 的应用受到限制。

(2) FMEA 方法最后是以表格的形式表达的,这对于单一的失效形式和失效影响的关系表达十分明确,但对于复杂系统,这样的表达存在一定的局限。

(3) FMEA 方法应用的前提是:需要足够数量的产品来生成足够的数据样本;需要长时间的历史资料和产品表现积累。

(4) FMEA 方法分析是团队行为,需要所涉及的各部门、各类专家共同参与,分析效果很大程度上取决于人员的经验水平,受到主观因素的影响。

(5) FMEA 确定失效的过程从本质上说是一种头脑风暴法的运行过程,这个过

程受到产品最初设计心理惯性 (psychological inertia, PI) 的影响。

(6)FMEA 缺乏集成的问题解决机制来纠正设计缺陷,更不能以一种创造的方式解决创新性的技术问题。传统的问题解决方法往往使设计成本增加,或者对系统进行修正而使其变得更加复杂。

1.3.3 AFD 方法

1. AFD 方法概述

预期失效分析 (anticipatory failure determination, AFD) 是在 ARIZ^[19-20] 中理想解和冲突的基础上发展起来的。TRIZ 中的 ARIZ 工具主要是用于发明问题的解决,发明问题的一般形式为“怎样实现某个功能”。而失效分析的问题形式通常为“这种失效发生的根本原因是什么”或者“系统/过程可能发生什么失效”,因此从常规思维方式上,ARIZ 是不可能用于失效分析的。

Zlotin 等采用逆向思维的方法将 ARIZ 逆向应用于失效分析,提出了 AFD 方法。在此基础上,美国 Ideation International 公司开发了失效预测软件“Ideation Failure Prediction”和失效分析软件“Ideation Failure Analysis”。这两种软件都用于设计阶段的失效分析,前者用于预测可能发生的失效并提出改进措施 (AFD-2),后者用于对已经发生的失效进行原因分析并提出改进措施 (AFD-1)^[11]。

AFD 方法的两种分析应用过程分别如表 1.3.3 和表 1.3.4 所示。

2. AFD 方法的特点

AFD 失效分析的核心就是利用逆向思维将理想状态反转,找出系统中可能发生的“所有”失效模式。传统失效分析方法思考的问题是“为什么失效会发生?系统中会发生哪些失效?”,而 AFD 中设计者思考的是“怎么让失效发生?如何让系统不能正常运行?”^[11]。

表 1.3.3 AFD-1 模板

步骤	内容
1. 明确表述初始问题	对系统命名、说明其目的、描述已经发生的失效
2. 确定成功模式	按阶段列出想要完成的功能及其成功的结果
3. 局部化失效	识别出最后的事件、简化失效分析
4. 阐明和放大逆向问题	转化为一个发明问题——询问“如何去做某些事情从而使某些失效发生?”,并在空间和时间上放大
5. 寻求解决方案	根据步骤 4 中的逆向问题,利用系统中和系统周围的资源搜索可能产生该问题的明显的解